

논문 2008-45TC-10-8

# 평면형 Fin-line 테이퍼를 이용한 사파이어 기반의 94 GHz CPW-구형 도파관 변환기

( Sapphire Based 94 GHz Coplanar Waveguide-to-Rectangular  
Waveguide Transition Using a Unilateral Fin-line taper )

문성운\*, 이문교\*, 오정훈\*, 고동식\*, 황인석\*\*, 이진구\*\*, 김삼동\*\*

( Sung-Woon Moon, Mun-Kyo Lee, Jung-Hun Oh, Dong-Sik Ko, In-Seok Hwang, Jin-Koo Rhee, and  
Sam-Dong Kim )

## 요 약

본 연구에서는 94 GHz 송수신 시스템에 응용이 가능한 평면형 회로 내의 전송 선로 방식의 하나인 CPW(Coplanar Waveguide)와 구형 도파관 간의 신호를 원활히 전달해주는 94 GHz CPW-구형 도파관 변환기를 설계하고 제작하였다. 제안된 변환기는 단일 면에 구현된 Fin-line 테이퍼와 Open 타입의 CPW Slot-line 변환기 구조로 구성되어 있으며, 이는 MMIC의 플립칩 본딩을 위해 기존의 MMIC 기술을 이용하여 단단하고 구부러지지 않는 사파이어( $Al_2O_3$ )기판위에 구현되었다. Ansoft사의 HFSS 툴을 이용하여 최적화된 Single-section 변환기를 Back-to-back 구조의 지그로 제작하였고 Anritsu ME7808A Vector Network Analyzer 장비를 이용해 85 ~ 105 GHz 대역에서 S-파라미터들을 측정하였다. 측정 결과, 3 mm 길이를 갖는 CPW의 삽입 손실을 고려하여 94 GHz에서 약 1.7 dB의 삽입 손실과 25 dB 이상의 반사손실을 확인 하였다.

## Abstract

We design and fabricate the 94 GHz Coplanar waveguide(CPW)-to-rectangular waveguide transition that is transmits signal smoothly between the CPW, which is a popular transmission line of the planar circuits, and rectangular waveguide for the 94 GHz transceiver system. The proposed transition composed of the unilateral fin-line taper and open type CPW-to-slot-line transition is based on the hard and inflexible sapphire for the flip-chip bonding of the planar MMICs using conventional MMIC technology. We optimize a single-section transition to achieve low loss by using an EM field solver of Ansoft's HFSS and fabricate the back-to-back transition that is measured by Anritsu ME7808A Vector Network Analyzer in a frequency range of 85 ~ 105 GHz. From the measurement and de embedding CPW with 3 mm length, an insertion and return loss of a single-section transition are 1.7 dB and more than 25 dB at 94 GHz, respectively.

**Keywords :** 94 GHz, CPW, 구형 도파관 변환기, Fin-line 테이퍼, slot-line

## I. 서 론

마이크로파 및 밀리미터파 회로 영역에서 평면형 단일 집적 회로에 대한 관심과 연구 개발은 지속적으로 증가하고 상당한 업적들을 이루어 냈다. 그럼에도 불구하고

하고 여전히 상대적으로 부피가 큰 구형 도파관(Rectangular waveguide) 없이는 낮은 손실의 송수신 입·출력을 구현하기가 어렵고 높은 파워를 다룰 수가 없다. 게다가 소자들의 특성을 측정하기 위한 시스템마저 도파관으로 구현되어 있다. 따라서 평면형 회로와 도파관간의 신호를 원활하게 전달해주고 효율적인 집적도를 높여주는 구조의 변환기가 필요하다.

평면형 회로 내에서 CPW(Coplanar waveguide)는 마이크로스트립 구조에 비하여 낮은 산란효과와 간단한 공정 프로세스 및 높은 집적도 덕분에 초고주파 응용에

\* 학생회원, \*\* 정회원, \*\*\* 평생회원,  
동국대학교 밀리미터파 신기술 연구센터  
(Millimeter-wave Innovation Technology  
research center, MINT)  
접수일자: 2008년5월13일, 수정완료일: 2008년10월16일

널리 사용되는 전송 선로 방식이다. 그러나 CPW-구형 도파관 변환기는 마이크로스트립-구형 도파관 변환기에 비하여 연구 보고가 부족한 편이며 설계 방식이 제한적이다. 지금까지 일반적으로 알려진 구조들을 살펴보면, Quasi-Yagi 안테나<sup>[1]</sup>, 테이퍼 형태의 Slot-line 프로브<sup>[2-3]</sup>, 도파관의 진행방향과 나란한 프로브<sup>[4]</sup>, 그리고 Fin-line 테이퍼<sup>[5-6]</sup>를 이용한 구조들이 있다. 이들 모두 E-plan 도파관의 신호 전달 방향과 나란한 구조들이며 대부분 X-band (8.2 ~ 12.4 GHz)와 낮은 유전율을 갖는 기판에 최적화 되어 있다. (예외적으로 참고문헌 [1, 3, 5]에서는 높은 유전율의 기판에 최적화된 구조가 소개되어 있다.)

본 논문에서는 타 구조에 비하여 설계 및 제작이 용이하고 동작 주파수 대역폭이 넓은 기존의 평면형 Fin-line 테이퍼 구조를 이용하여 94 GHz 대역과 같은 높은 밀리미터파 대역에서 응용이 가능하도록 설계하고 제작하였다. 또한 MMIC(Monolithic Microwave Integrated Circuit)의 플립칩 마운트가 가능하도록 단단하고 유전율이 높은 사파이어( $Al_2O_3$ ) 기판을 이용하였다. 물론 기존에도 평면형 Fin-line 테이퍼를 이용하여 높은 유전율의 기판을 기반으로 제작<sup>[5]</sup>된 바 있으나 이는 Short Slot-line 방사형 스테브를 이용한 구조로서 기판과 집적된 증폭기의 DC 바이어스에 문제를 일으킬 여지가 있었다. 따라서 본 연구에서는 안전한 증폭기 바이어싱을 위하여 Open 타입의 스테브를 이용하였고, Ansoft사의 HFSS 툴을 기반으로 최적화된 변환기를 Back-to-back 구조로 구현하여 85~105 GHz 대역에서 측정하였다.

## II. CPW-구형 도파관 변환기 설계

평면형 Fin-line 테이퍼는 기판의 동일면에 테이퍼 구조의 전도체를 구현하여 구형 도파관의  $TE_{10}$ 모드의 전개 분포를 Fin-line의 좁은 홈으로 모아주면서 Slot-line 모드로 변환되어 평면회로에 전달해주는 필드 정합 및 임피던스 정합용으로 널리 쓰이는 구조이다. 더욱이 CPW-Slot-line 변환기<sup>[7]</sup>가 이미 널리 보고되고 응용되고 있기 때문에 Fin-line 테이퍼 구조는 CPW-구형 도파관 변환기에 적용하기에 매우 적절한 구조임이 틀림없다.

그림 1은 본 연구에서 제안한 CPW-구형 도파관 변환기로서 크게 Fin-line 테이퍼, CPW-Slot-line 변환기, 그리고 두 파트의 임피던스를 정합하는 Transformer, 세 가지 파트로 구성되어 있다. 중심주파수는 94 GHz 로서 W-band(75 ~ 110 GHz)용 WR10 구형 도파관(width a

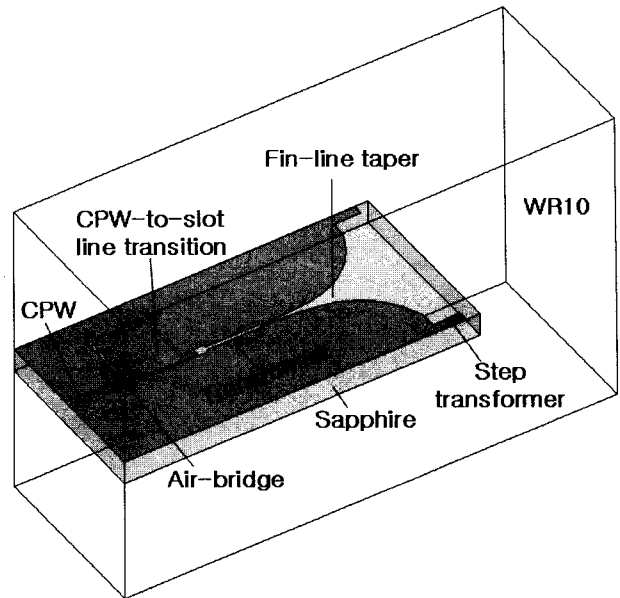


그림 1. Fin-line 테이퍼를 이용한 CPW-구형 도파관 변환기

Fig. 1. CPW-to-Rectangular waveguide transition using Fin-line taper.

= 2.54 mm, height  $b = 1.27$  mm)을 사용하며, 200  $\mu$ m 두께의 사파이어 기판위에 구현된 Fin-line 테이퍼는 E-plan 도파관의 높이( $b$ )의 중간에 위치하여 도파관의  $TE_{10}$  모드를 커플링 하고 Slot-line 형태로 원활히 평면회로에 전달하도록 한다. 이때 Slot-line 모드를 CPW 모드로 변환시켜주는 CPW-Slot-line 변환기가 필요하며 DC 바이어스와의 격리를 위해 Open 타입의 스테브를 이용하였다. 특히 두 개의 Slot-line의 180° 위상차를 유지해주는 Air-bridge의 위치가 모드 변환에 있어서 매우 중요한 역할을 한다.

변환기 설계에 있어서 기본 포인트는 각 파트별 주파수에 따른 임피던스가 적게 변화되는 구조적인 변수 값을 찾고 각각의 최적화된 파트들의 임피던스를 정합시키는 것이다. 각 파트의 설계는 다음 절에서 소개한다.

### 1. 평면형 Fin-line 테이퍼 설계

Fin-line 테이퍼인 경우 일반적으로 그림 2에서 보듯이 Straight-line, Half-cosine, 그리고 Exponential 세 가지 테이퍼 함수<sup>[8]</sup>를 이용한 구조들이 있다. 여기서는 WR10 표준 도파관 규격을 고려하고, 0.7  $\mu$ m 두께의 metal(=gold)을 함수 (1), (2), (3)을 적용해 200  $\mu$ m 두께의 사파이어 기판위에 구현하여 중심 주파수 94 GHz에서 테이퍼 길이( $L$ )에 따른 반사손실을 계산한 결과 그림 3과 같은 데이터를 확인 하였다.

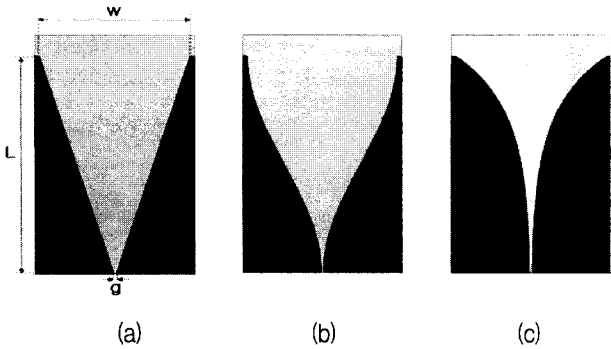


그림 2. 세 가지 타입의 Fin-line 테이퍼 구조, (a) straight-Line, (b) half-Cosine, (c) exponential 테이퍼  
 Fig. 2. Three types of Fin-line taper, (a) straight-Line, (b) half-Cosine, (c) exponential tapers.

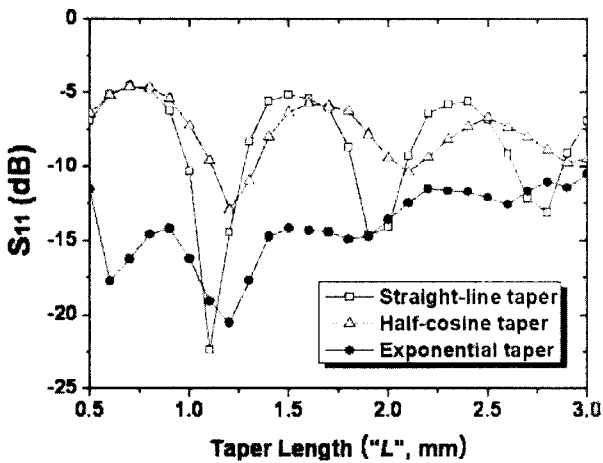


그림 3. 테이퍼 길이에 따른 세 가지 타입의 반사손실 특성 비교 (@ 94 GHz)  
 Fig. 3. Comparison of return loss against taper length for three types of Fin-line tapers (@ 94 GHz).

$$f(x) = \left(\frac{w-g}{2 \cdot L}\right) \cdot x + \frac{g}{2} \text{ Straight-line} \quad (1)$$

$$f(x) = \left(\frac{w-g}{4}\right) \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot x}{L}\right) + \frac{w-g}{4} \text{ Half-cosine} \quad (2)$$

$$f(x) = (w/2) \cdot \exp\left[\frac{x}{L} \cdot \ln\left(\frac{g}{1.27}\right)\right] \text{ Exponential} \quad (3)$$

그림 3에서 보이듯이 Exponential 테이퍼가 다른 구조에 비하여 길이에 따른 반사손실이 덜 민감하며 테이퍼 길이가 약 1.2 mm 중심으로 15 dB 이상의 반사손실을 갖고 있다. 이를 바탕으로 1.2 mm 길이를 갖는 Exponential 테이퍼구조를 구현하고 이를 주파수에 따른 임피던스 변화가 최소인 최적의  $w$ 와  $g$  값을 찾는다. 그러나 사파이

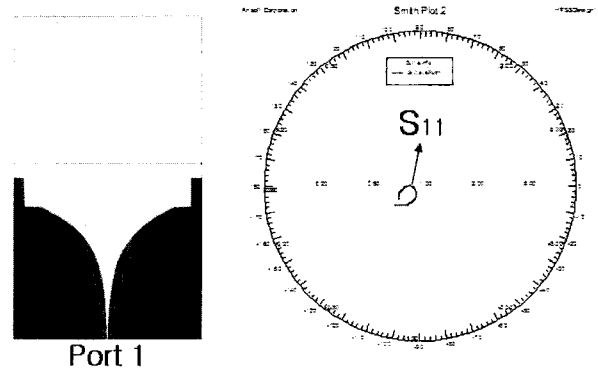


그림 4. 최적화 된 Fin-line 테이퍼 구조와 임피던스 특성 (85 ~ 105 GHz)  
 Fig. 4. The optimized Fin-line taper and impedance characteristics (85 ~ 105 GHz).

어와 같은 높은 유전율( $\epsilon_r=10$ )의 기판일 경우 공기와의 높은 불연속 효과 때문에  $w$ 와  $g$  값만 가지고 임피던스 변화를 최소화하기에는 한계가 있다. 불연속 효과를 줄이기 위해서는 기판 경계면을 Notch 나 Protrusion 형태<sup>[9]</sup>로 가공되어야 하나 사파이어 기판은 매우 단단하고 가공이 어렵기 때문에 그림 1과 같은 Step transformer를 Fin-line 테이퍼 끝에 구현하여 불연속 효과를 줄인다<sup>[9]</sup>. 이를 바탕으로 최적화 된 Fin-line 테이퍼의 구조와 시뮬레이션 결과를 그림 4에서 보여준다.

### 2. CPW-Slot-line 변환기 설계

CPW-Slot-line 변환기일 경우 두 Slot-line 간의 180° 위상차와 Air-bridge가 필요하다. Air-bridge는 Slot-line의 excitation을 방지하고 180° 위상차를 유지하기 위해 모드의 전환점이 시작되는 곳에 위치하여 CPW 모드와 Slot-line 모드간의 전환을 원활하게 한다. 이때 Air-bridge는 폭이 25  $\mu\text{m}$ , 전송라인과 5  $\mu\text{m}$  정도의 높이로 떨어져 있

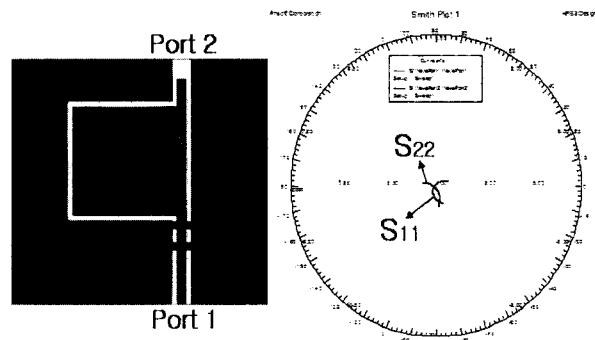


그림 5. 최적화 된 CPW-Slot-line 변환기 구조와 임피던스 특성 (85 ~ 105 GHz)  
 Fig. 5. The optimized CPW-to-Slot-line transition and impedance characteristics (85 ~ 105 GHz).

으며 본 연구실의 MMIC 공정 프로세스<sup>[10]</sup>를 이용하여 균일한 구조와 특성을 얻을 수 있다. 그림 5는 최적화된 CPW-Slot-line 변환기의 E-field overlay와 시뮬레이션 결과를 보여준다.

3. Single-section CPW-구형도파관 변환기 설계  
 최종적으로 최적화 된 두 파트 사이에 임피던스 정합을 위한 Slot-line transformer를 삽입하여 Single-section 변환기 구조를 완성하고 CPW 모드와 구형 도파관의 TE<sub>10</sub>모드간의 전송 특성을 검증한다. Slot-line transformer의 길이와 폭은 HFSS의 파라미터 스위치를 이용하여 85 ~ 105 GHz 대역에서 반사 손실이 최대가 되는 값들을 찾아 설계한다. 그림 6에서 보이듯이 시뮬레이션 결과 88 ~ 101 GHz 대역에서 삽입 손실이 약 1 dB이며 반사 손실이 20 dB 이상임을 확인하였다.

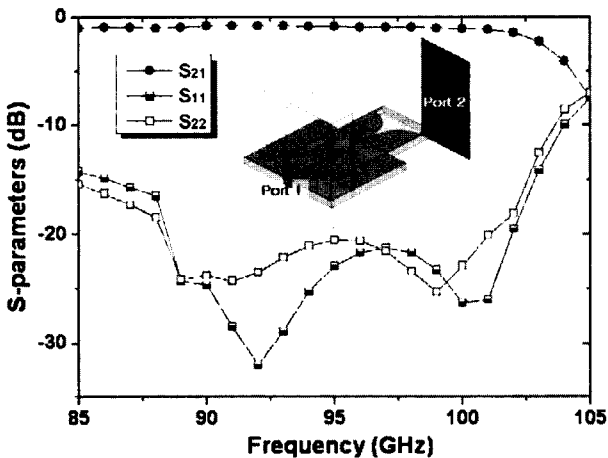
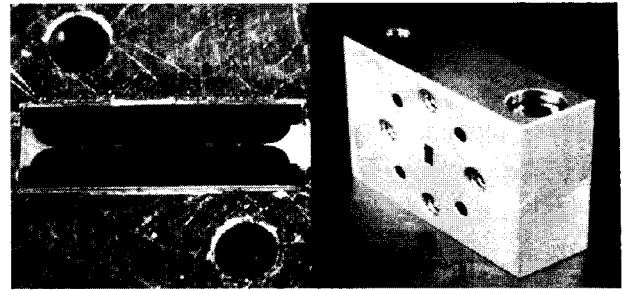


그림 6. 최적화 된 Single-section CPW-구형 도파관 변환기의 시뮬레이션 결과

Fig. 6. The Simulated results of the optimized single-section CPW-to-Rectangular waveguide transition.

### III. 제작 및 측정 결과

Back-to-back 구조의 사파이어 기반 변환기를 본 연구실의 MMIC 공정 프로세스 기술<sup>[10]</sup>을 이용하여 제작하였고 이를 측정하기 위한 지그를 설계하여 정밀 가공업체에 제작 의뢰를 하였다. CPW 전송 선로는 3 mm 길이를 가지며, 지그의 폭과 길이는 각각 28 mm 와 9 mm, 높이는 20 mm 로 제작되었다. 그림 7에서 보이듯이 제작된 변환기를 하단 지그에 전도성 에폭시를 이용하여 마운트를 하고 상단 지그로 하우징을 하여 Anritsu ME7808A Vector Network Analyzer 장비를 이용하여 S-파라미터



(a) (b)

그림 7. 측정용 Back-to-back 지그, (a) 마운트된 변환기, (b) 제작 완료된 지그

Fig. 7. The back-to-back jig for measurement, (a) mounted transition, (b) completed jig.

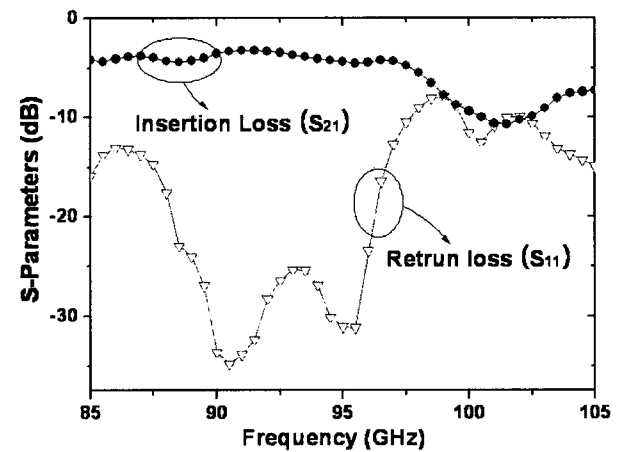


그림 8. 제작된 back-to-back 변환기의 측정 결과

Fig. 8. The measured results of the fabricated back-to-back transition.

들을 측정하였다. 그림 8은 실제 제작된 Back-to-back 변환기의 측정결과를 보여준다.

측정 결과, 삽입 손실은 85 ~ 97 GHz 대역에서 약 4 dB를, 반사 손실은 87 ~ 96 GHz 대역에서 20 dB 이상을 유지하였다. 3 mm 길이를 갖는 CPW 전송 선로의 0.6 dB 손실을 보상했을 경우 실제 Single-section 변환기의 삽입 손실은 약 1.7 dB 임을 알 수 있다. 94 GHz 응용에 있어서 무난한 특성이지만 실제 시뮬레이션 결과와 비교할 경우 삽입 손실이 0.7 dB 증가하고 반사손실의 대역폭이 줄어들면서 낮은 주파수 방향으로 Shift 되는 경향을 확인하였다. 이는 W-band 대역 주파수의 파장 길이와 매우 작은 WR10 표준 도파관의 단면적을 고려해 볼 때, 미세한 가공 및 마운트의 오차와 경계면의 불일치, 혹은 표면 거칠기(surface roughness)에 따라서 민감하게 달라지는 전송 특성에 기인한다. 특히 10 GHz 이상의 주파수 대에서는 동작 주파수의 파장이 작아서 표면에 존재하는 흠이나 균일 흔적 등이 금속면의 skin depth와 비교할 만

한 크기가 되어 예상치 못한 손실과 정합 불일치가 발생한다<sup>[11]</sup>. 적어도 10  $\mu\text{m}$  이내의 공차를 허용하는 미세한 지그 가공과 정밀한 제작이 수반된다면 향상된 결과를 얻을 수 있을 것이다.

#### IV. 결 론

본 연구에서는 중심 주파수가 94 GHz 이고 MMIC의 플립칩 본딩을 위해 단단하고 높은 유전율의 사파이어 기판을 기반으로 Fin-line 테이퍼를 이용한 CPW-구형도파관 변환기를 설계하고 제작하였다. 측정 결과 94 GHz에서 1.7 dB 의 삽입 손실과 25 dB 이상의 반사 손실을 보여주어 변환기로서의 충분한 성능을 확인하였고, 제작된 변환기는 94 GHz 레이다 송수신 시스템에 응용할 수 있을 것으로 사료된다.

#### 참 고 문 헌

- [1] N. Kaneda, Y. Qian, and T. Itoh, "A broadband CPW-to-Waveguide Transition using Quasi-Yagi Antenna," in *Proc. IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, pp. 617-620, 2000.
- [2] T.-H. Lin, R.-B. Wu, "CPW to waveguide transition with tapered slotline probe," *IEEE Microwave Wireless Compon. Lett.*, vol. 11, no. 7, pp. 314-316, July 2001.
- [3] C.-F. Hung, A.-S. Liu, C.-L. Wang, and R.-B. Wu, "Bandwidth enhancement on waveguide transition to Conductor backed CPW with high dielectric constant substrate," *IEEE Microwave Wireless Compon. Lett.*, vol. 15, no. 2, pp. 128-130, Feb. 2005.
- [4] V. S. Möttönen, A. V. Räisänen, "Novel wide-band coplanar waveguide-to-rectangular waveguide transition," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 52, no. 8, pp. 1836-1842, Aug. 2004.
- [5] V. S. Möttönen, "Wideband coplanar waveguide-to-rectangular waveguide transition using fin-line taper," *IEEE Microwave Wireless Compon. Lett.*, vol. 15, no. 2, Feb. 2005.
- [6] J. V. Bellantoni, R. C. Compton, and H. M. Levy, "A new W-band coplanar waveguide test fixture," in *Proc. IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, pp. 1203-1204, 1989.
- [7] K.-P. Ma, Y. Quan, and T. Itoh, "Analysis and applications of a new CPW-slotline transition," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 47, no. 4, pp. 426-432, Apr. 1999.
- [8] Jimmy G. M. Yip, A. K. Jastrzebski, R. J. Collier, and D. Li, "The design of waveguide-to-finline taper transition at millimeter wave frequencies," in *Proc. Microwaves. Radar. Wireless Comm.*, vol. 1, pp. 282-285, 2002.
- [9] Wolfgang J. R., Hoefer, and Cornelius J. Verver, "Optimal waveguide to E-plane circuit transitions with binomial and chebyshev transformers," in *Proc. European Microwave Conference 14th*, pp. 305-310, 1984.
- [10] B. -H. Lee, S.-D. Kim, and J. -K. Rhee, "Small-signal analysis of high maximum frequency of oscillation 0.1- $\mu\text{m}$  off-set Gamma shaped gate InGaAs/InAlAs/GaAs metamorphic high-electron-mobility transistors," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 43, pp. 1914-1918.
- [11] 여준호, 김채영, 최현철, "구형도파관의 벽면거칠기가 고려된 감쇄상수 계산," 대한전자공학회 학술대회 논문집 제16권 1호, pp. 84~87, 1993년 7월.

저 자 소 개



문 성 운(학생회원)  
 2004년 2월 동국대학교  
 전자공학과 학사 졸업.  
 2006년 2월 동국대학교  
 전자공학과 석사 졸업.  
 2006년 3월~현재 동국대학교  
 전자공학과 박사과정.

<주관심분야 : 밀리미터파 시스템, MIMIC 및 패키징>



오 정 훈(학생회원)  
 2003년 2월 동국대학교  
 기계공학과 · 전자공학과  
 학사 졸업.  
 2005년 2월 동국대학교  
 전자공학과 석사 졸업.  
 2005년 3월~현재 동국대학교  
 전자공학과 박사과정.

<주관심분야 : MMIC 반도체 소자 및 공정>



황 인 석(평생회원)  
 1972년 서울대학교  
 전자공학과 졸업(공학사).  
 1978년 Univ. of Wisconsin-  
 Madison 전자공학과  
 석사과정(공학석사).  
 1982년 Univ. of Wisconsin-  
 Madison 전자공학과  
 박사과정 (공학박사).

2000년~현재 동국대학교 전자공학과 교수.  
 <주관심분야 : VLSI Design/Technology,  
 Computer Architecture>



김 삼 동(정회원)  
 1983년 서울대학교  
 금속공학과 졸업(공학사).  
 1986년 서울대학교 금속공학과  
 석사과정(공학석사).  
 1992년 Department of Materials  
 Science & Engineering  
 Stanford Univ. 박사과정  
 (공학박사).

1994년 Stanford Univ. Solid State Electronic  
 Lab. Post-Doctorate.  
 1999년 현대 전자 메모리 선행기술 연구부 박막  
 연구실 책임 연구원.  
 1999년~현재 동국대학교 전자공학과 교수.  
 <주관심분야 : MMIC 및 미소고체전자 현상 분  
 석>



이 문 교(학생회원)  
 1999년 2월 배재대학교  
 전자공학과 학사 졸업.  
 2001년 8월 동국대학교  
 전자공학과 석사 졸업.  
 2002년 9월~현재 동국대학교  
 전자공학과 박사과정.

<주관심분야 : 밀리미터파 시스템, MIMIC 및 패키징>



고 동 식(학생회원)  
 2007년 2월 동국대학교  
 전자공학과 학사 졸업.  
 2007년 3월~현재 동국대학교  
 전자공학과 석사 과정.  
 <주관심분야 : 밀리미터파 도파  
 관 VCO 및 패키징>



이 진 구(평생회원)  
 1969년 국립항공대학교 전자  
 공학과 졸업(공학사).  
 1975년 서울대학교 전자공학과  
 석사과정(공학석사).  
 1982년 Oregon State Univ. 전기  
 공학과 박사과정  
 (공학박사).

1985년 Cray Research Scientist.  
 1985년 Microwave Semiconductors, USA,  
 Senior Engineer.  
 1985년~2003년 대한전자공학회 부회장.  
 2004년~2005년 대한전자공학회 수석부회장.  
 2005년~2006년 대한전자공학회 회장.  
 1985년~현재 동국대학교 전자공학과 교수.  
 1999년~현재 밀리미터파 신기술 연구센터 소장.  
 <주관심분야 : MMIC설계, 소자 모델링>